

Introducción a la microscopía y nanoscopía a frecuencias GHz y THz[◊]

Introduction to microscopy and nanoscopy at GHz and THz frequencies

Naser Qureshi,*• César Leonardo Ordóñez Romero,**
Amado Velázquez Benítez,* Oleg Kolokoltsev*

ABSTRACT: The current state of microwave microscopy and millimeter waves, its advantages and challenges are summarized. Although traditional optical microscopy and its recent variants, which include super-resolution methods, is by far the most versatile and used microscopy in science, there are specific applications in which microscopy in ranges of the electromagnetic spectrum with greater wavelength can provide physical information not accessible with optics. This article summarizes some recent examples, particularly those developed in Mexico.

KEYWORDS: microwave microscopy, millimeter waves, electromagnetic spectrum, gigahertz, terahertz.

RESUMEN: Se da cuenta del estado actual de la microscopía con microondas y ondas milimétricas, sus ventajas y sus retos. Aunque la microscopía óptica tradicional y sus variantes recientes, que incluyen métodos de super-resolución, es por mucho la microscopía más versátil y usada en las ciencias, existen aplicaciones puntuales en las que la microscopía en rangos del espectro electromagnético con mayor longitud de onda puede proporcionar información física no accesible con la óptica. En este artículo damos a conocer algunos ejemplos recientes, en particular aquellos desarrollados en México.

PALABRAS CLAVE: microscopía con microondas, ondas milimétricas, espectro electromagnético, gigahertz, terahertz.

Introducción

El instrumento óptico comúnmente conocido como microscopio óptico compuesto (Hecht, Optics, 2017) fue durante cuatro siglos la única manera práctica de observar el mundo microscópico. Tuvo un papel básico en la microbiología, en nuestro entendimiento de los procesos de la vida, y es esencial prácticamente en todas las ciencias modernas. No es coincidencia que este instrumento científico tan común se base en la captación de un pequeño frag-

Recibido: 17 de septiembre, de 2019.

Aceptado: 11 de octubre de 2019.

[◊] Se agradece el apoyo del proyecto Conacyt 253754 y PAPIIT IG100519.

* Instituto de Ciencias Aplicada y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

** Instituto de Física, UNAM.

• Autor de correspondencia: naser.qureshi@icat.unam.mx



mento del espectro electromagnético: la luz visible. No solo es la región del espectro en que los seres vivos ven, sino también la cantidad de información que nos puede dar la luz visible sobre la materia común: es inmensa; y no hay otra onda que pueda compararse a la luz. Aun hoy, los microscopios más avanzados se basan en luz visible (Hell *et al.*, 2007), y son herramientas fundamentales en las ciencias de la vida. La limitante principal de la microscopía con luz ha sido su resolución: los microscopios tradicionales no pueden distinguir objetos más pequeños que la longitud de onda, aproximadamente medio micrómetro. Esto es un límite físico, conocido como el *límite de difracción*. Los microscopios ópticos más recientes, con todo y “súper-resolución”, están limitados a una resolución de aproximadamente una décima parte de la longitud de onda.

Fue hasta la segunda mitad del siglo XX cuando empezó a crecer de manera sustancial el uso de microscopios en otras regiones del espectro electromagnético, y con sondas diferentes a las de la luz. Los microscopios electrónicos (SEM, TEM) y los microscopios de fuerza atómica (AFM) se consolidaron rápidamente como herramientas básicas en las ciencias de materiales, metallurgia, etc., por su capacidad de amplificar hasta el nivel atómico, superando en su resolución hasta el régimen nanométrico.

En los últimos veinte años, diversos grupos de investigación alrededor del mundo han explorado un camino nuevo en la microscopía: las microondas (Bjorn *et al.*, 2002) y las ondas milimétricas (Dhillon *et al.*, 2017). A primera vista, esto podría parecer un camino poco sabio, considerando que la longitud de onda es muy grande comparada con la de la luz, desde milímetros a centímetros, y esto puede limitar la resolución a dichas escalas si tratáramos de enfocar esta radiación para formar imágenes. Sería de poca utilidad un “microscopio” que no puede ver algo más pequeño que un centímetro. Sin embargo, hay más física interesante en este orden de magnitud. Con radiación de microondas, milimétricas y terahertz, tenemos acceso a formas diversas y efectivas de enfocar la radiación que permiten llegar a resoluciones nanométricas. Adicionalmente, la interacción de esta radiación con materia puede ser muy diferente a la interacción luz-materia, lo cual hace a la radiación GHz y THz sensible a efectos físicos que no se ven con luz.

Este artículo resume algunos ejemplos exitosos en la microscopía gigahertz (GHz) y terahertz (THz), y la diversidad de efectos físicos a los que se puede acceder, caracterizar y controlar a partir de estas técnicas.

Microscopía de microondas

A una frecuencia de 1 GHz, la radiación electromagnética tiene una longitud de onda de aproximadamente 30 cm en el espacio libre. Sin embargo, dentro de dispositivos de telecomunicación o dentro de microchips, existen tecnologías muy desarrolladas para confinar y transmitir esta radiación en espacios mucho más reducidos que la longitud de onda. En telecomunicaciones, un simple *cable coaxial* puede transmitir una onda en este rango de frecuencias en un diámetro

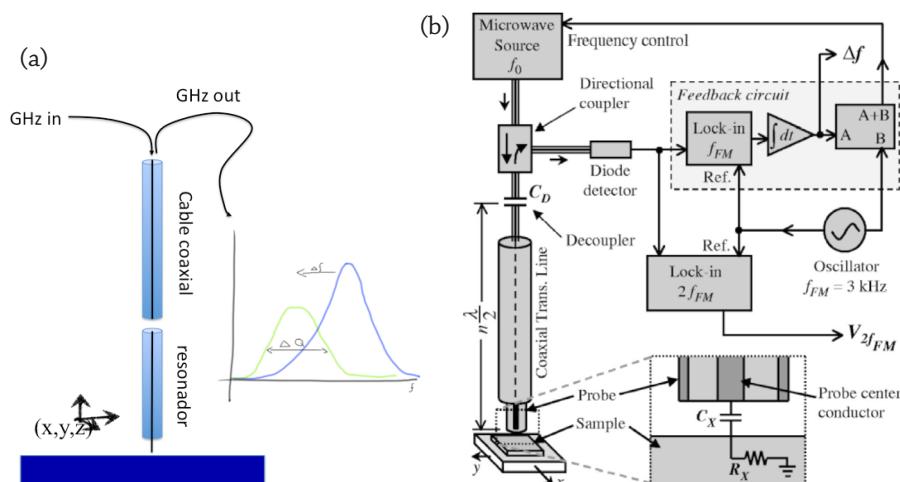


de pocos milímetros. En los microchips, alambres conocidos como *líneas de transmisión* de micrómetros o hasta decenas de nanómetros transmiten señales codificadas en radiación de 1-3GHz. En efecto, esta radiación está confinada en el *campo cercano*, mucho más pequeño que la longitud de onda.

La idea de explotar este confinamiento en el campo cercano para realizar un microscopio de microondas tiene al menos 80 años (Synge, 1928). No obstante, en las últimas tres décadas, hubo un desarrollo sostenido en esta dirección.

La implementación más sencilla se puede realizar con un arreglo de cables coaxiales (figura 1). Una fuente de microondas con frecuencia y fase controlada lanza una onda electromagnética a través de un cable coaxial hacia un resonador. El resonador consiste en un cable coaxial cortado a una longitud calculada para que las ondas se reflejen en cada extremo de la estructura y cada reflexión interfiere constructivamente con la onda incidente. De esta manera, se acumula una energía apreciable de microondas dentro del resonador a una frecuencia bien definida. En un extremo del resonador, una punta metálica muy afilada —en una escala micro o nanométrica— concentra parte de esta radiación de microondas en un volumen muy reducido, en el campo cercano. Cuando esta punta se acerca a una muestra, o a algún material, que interactúa con la radiación, las propiedades electromagnéticas del resonador se modifican. Midiendo muy pequeños cambios en la frecuencia resonante del resonador, se puede medir la impedancia en la superficie de la muestra. Con un escaneo controlado de la punta, un microscopio de microondas forma imágenes de la impedancia eléctrica de una superficie.

FIGURA 1. a) Esquema simplificado de microscopía de microondas, y, b) esquema detallado de un microscopio de microondas.

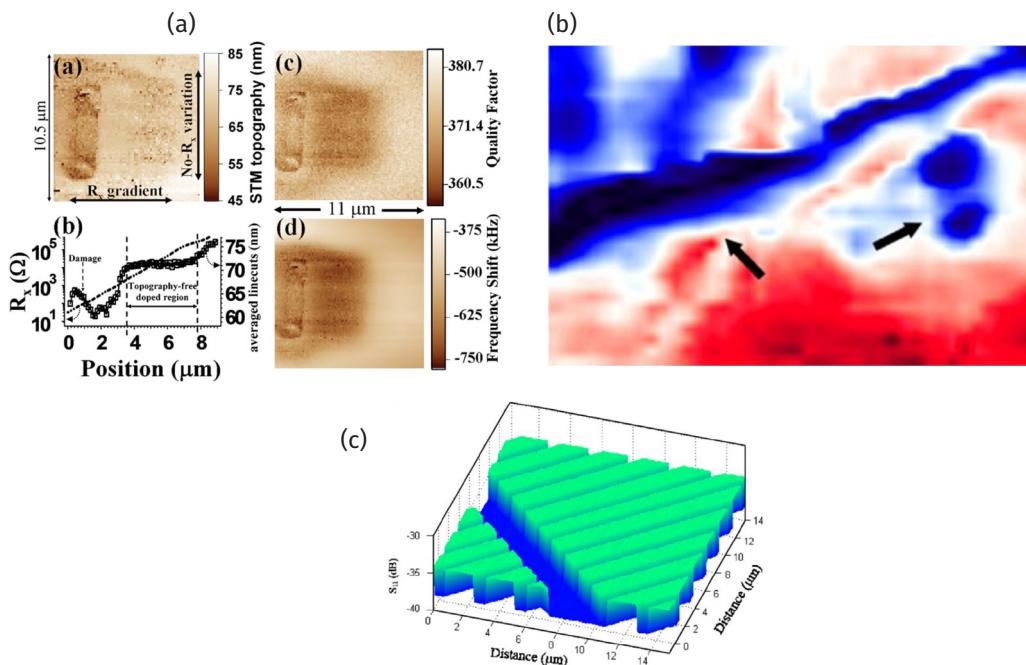


Fuente: Tomada Bjorn et al. (2002).

En la práctica, instrumentos de microondas pueden medir cambios en frecuencia resonante con sensibilidad de una parte en un 10^6 o mejor, razón por la cual la microscopía de microondas ha demostrado ser una técnica de alta sensibilidad en la medición de propiedades electrónicas de materiales. Asimismo, con técnicas de microfabricación, se pueden realizar resonadores y sondas (o puntas de resonador) en escala nanométrica, por lo que varios grupos de investigación han logrado obtener imágenes con microscopía de microondas con una resolución nanométrica. La figura 2 muestra algunos de los casos más exitosos.

Comparado con la microscopía óptica, la microscopía de microondas tiene ciertas ventajas: las microondas penetran tejidos biológicos, penetran semiconductores, y son sensibles a la conductividad local. Las aplicaciones de esta técnica han sido, hasta la fecha, limitadas comparado a la microscopía óptica, a pesar de su resolución superior. La razón principal es la necesidad de usar muestras planas, recortadas de manera óptima. En la figura 2 podemos observar ejemplos de prueba de concepto que serían menos alcanzables con óptica: la imagenología dentro de huesos de mamífero, resaltando la estructura interna, y la imagenología de dominios magnéticos en un disco duro.

FIGURA 2. a) Resolución nanométrica obtenida con un microscopio de microondas; b) imagen de tejido óseo de una costilla en un rango de 150 μm ; c) imagen de dominios magnéticos en un disco duro.



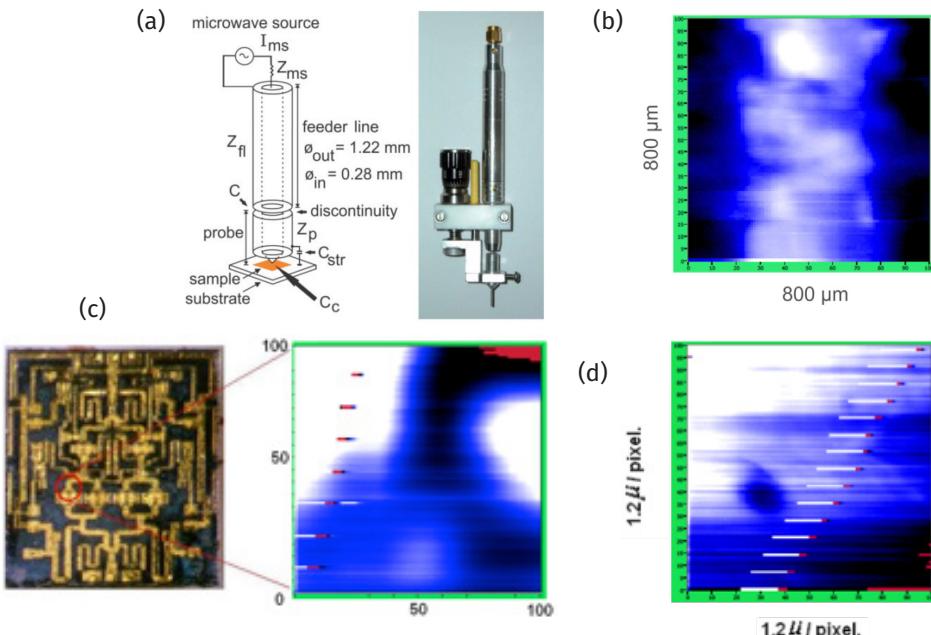
Fuente: a) Imtiaz et al. (2007); b) Park et al. (2005), y, c) Lee et al. (2009).



Con el objetivo de llegar a un instrumento más práctico a partir de las pruebas de concepto en la literatura, se han desarrollado dos instrumentos de microscopía de microondas en la UNAM. Ambos ilustran el esquema de una sonda de campo cercano escaneada para formar imágenes en escala micrométrica.

El primer ejemplo (figura 3) se basa en el diseño más común (López-Maldonado *et al.*, 2014), alimentado y medido por un analizador vectorial de redes (VNA) para medir de forma dinámica el espectro de absorción de un resonador de microondas mientras este resonador, con una punta micrométrica, se escanea sobre una superficie de interés. La contribución en este instrumento fue el desarrollo de un resonador coaxial fácil de fabricar y replicar para su uso en el campo. Hecho a partir de un proceso de pura fabricación mecánica, en este sistema se reportó una resolución de micrómetros y se demostró su uso en la caracterización de tres tipos de material. Se realizó una imagen calibrada de constante dieléctrica compleja de una muestra de grafito con topografía compleja, una imagen de vesículas dentro de una muestra de tejido de árbol, y una imagen de un microcircuito de silicio en el que se resaltan cambios en la concentración de electrones cerca de la superficie.

FIGURA 3. a) El resonador coaxial de un microscopio de microondas desarrollado en la UNAM; b) ejemplo de un mapa de impedancia en un material en polvo, en este caso grafito; c) imágenes en óptica (izquierda) y de microondas (derecha) resaltando un contraste en la concentración de electrones en un semiconductor, y, d) imagen de un ducto de resina en tejido de árbol en una imagen de microondas.



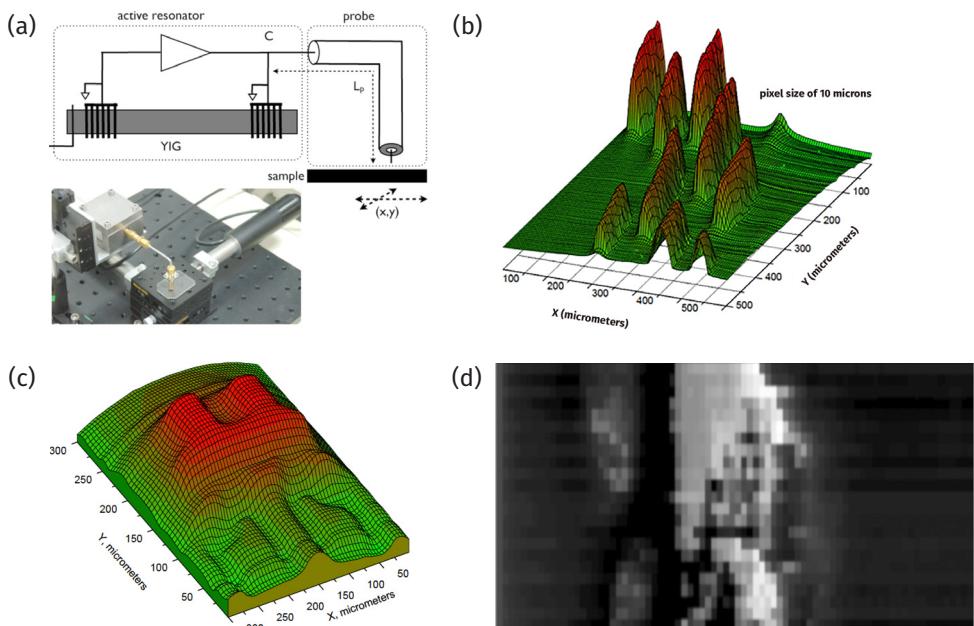
Fuente: Tomado de López-Maldonado *et al.* (2014).



Un segundo ejemplo es un instrumento que prescinde del uso de un VNA para bajar drásticamente el costo del sistema (figura 4). En este caso, se realizó un oscilador de microondas basado una resonancia de ondas de *spin*, conocido como un resonador de anillo (Qureshi *et al.*, 2012). La sonda coaxial se insertó directamente dentro del resonador, de tal forma que una pequeña interacción entre la sonda y una muestra perturba el resonador y cambia su frecuencia de emisión. De esta forma se introdujo el concepto de la sonda activa, ya que la sonda es parte de la fuente de microondas. Siendo de muy alto factor de calidad el resonador, con un ancho espectral de resonancia menos de una parte en 10^6 de la frecuencia resonante, el instrumento resulta ser más sensible a cambios en impedancia superficial que el diseño tradicional. Su uso se demostró con una imagen de células de cebolla en la que se observa un contraste en la concentración de agua y una imagen de un transistor en un microchip de silicio en el cual se aprecian variaciones en la concentración de electrones debajo de la superficie.

El poder de las sondas de campo cercano se destaca cuando se acopla su uso con un control sobre la física del objeto bajo medición, y esto puede resultar en una microscopía sensible a observables físicos inalcanzables con microscopía tradicional.

FIGURA 4. a) Imagen de un microscopio de microondas de sonda activa; b) imagen obtenida de células de cebolla; c) imagen de un transistor HEMT de bajo de la superficie de un semiconductor, y, d) imagen de grafito en polvo.

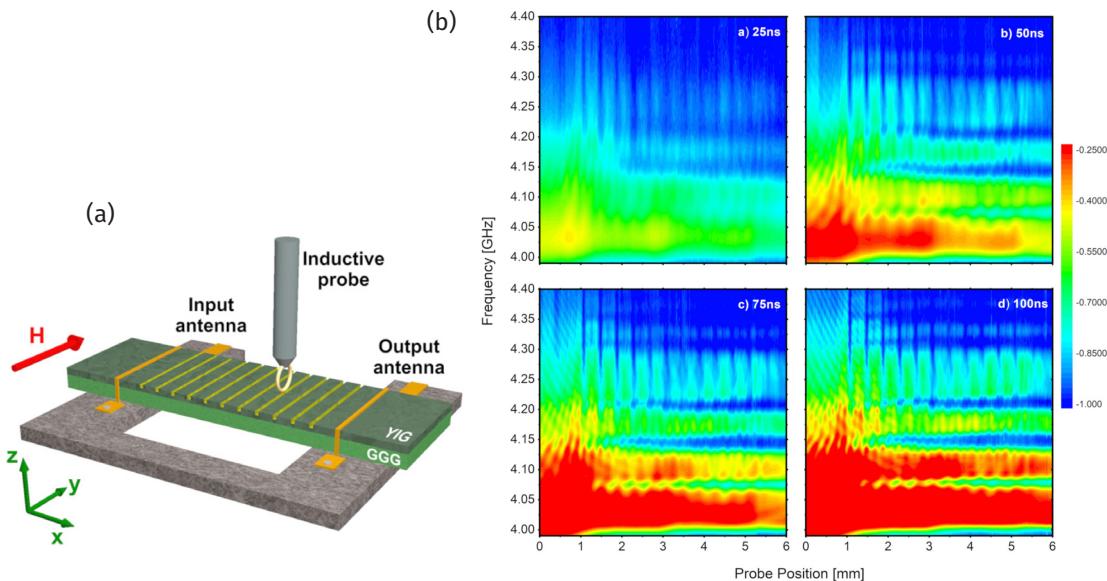


Fuente: Tomado de López-Maldonado *et al.* (2014).

Un ejemplo es la sonda de ondas de spin (figura 5) desarrollado en la UNAM (Ordoñez-Romero *et al.*, 2019). Aquí, un sencillo aro fabricado al final de un cable coaxial funge como un sensor de campo magnético en escala micrométrica. El objeto que se observa es una muestra del material ferrimagnético YIG, donde se excitan ondas de spin de forma controlada a través de una fuente de microondas, una antena acoplada al material, todo dentro de un campo magnético constante. El material YIG está microestructurado con daño periódico de tal forma que las ondas de *spin* pasan por una estructura efectivamente cristalina, conocida como *cristal magnónico*. Cercánamente análogo a un material cristalino en el que electrones pasan por un cristal de átomos, aquí las ondas de *spin*, o magnones en lenguaje cuántico, atraviesan un cristal magnónico con zonas de energía permitida y zonas prohibidas (*bandgaps*). Las ondas de *spin*, con una longitud de onda en escalas micrométricas y frecuencias de GHz, emanan un leve campo electromagnético en la superficie, conocido como campo electromagnético evanescente. Este campo evanesciente es lo que la sonda de aro microscópica capta y transmite a un cable coaxial para su subsecuente detección. Una vez escaneada espacialmente sobre la muestra de YIG, la sonda de microondas forma una imagen de la propagación de magnones, en el campo cercano con resolución micrométrica.

El valor científico de esta imagenología microscópica radica en la formación de una imagen directa de la propagación de magnones dentro de un

FIGURA 5. a) Una sonda magnética desarrollada para captar la onda evanescente de ondas de *spin* en un cristal magnónico, y, b) la observación de la formación de una zona prohibida (*bandgap*) dentro de un cristal magnónico como función de la propagación de los magnones.



Fuente: Tomado de López-Maldonado *et al.* (2014).



cristal, así como en mapear la formación paulatina de un *bandgap*, o zona prohibida. Esto es análogo a mapear la propagación de un paquete de electrones entre un número pequeño de átomos en un cristal y ver la formación de una zona prohibida. De este modo, la microscopía a frecuencias de microondas permite una visualización directa de un proceso cuántico.

Microscopía terahertz

El hecho de aumentar la frecuencia de la radiación usada en la microscopía desde los pocos GHz a frecuencias THz permite una mejoría en la resolución en el espacio libre (*campo lejano*), en vista de que la longitud de onda es de 300 um a 1THz, y permite tener acceso a diferentes propiedades espectroscópicas de los materiales (Beard *et al.*, 2002). Por otro lado, los cables coaxiales y líneas de transmisión descritos en la sección anterior llegan a ser poco funcionales por un importante aumento en las pérdidas electromagnéticas a frecuencias terahertz, por lo que los esquemas experimentales GHz dejan de ser útiles. La microscopía terahertz representa retos tecnológicos grandes, por la menor accesibilidad de fuentes, detectores y otros componentes funcionales en este rango (Adam, 2011).

Los primeros microscopios terahertz desarrollados en los años noventa del siglo XX eran esencialmente adaptaciones de espectrómetros de dominio de tiempo (Beard *et al.*, 2002). THz-TDS, que incluían un sistema de enfoque en el espacio libre (Hu *et al.*, 1995), limitado por difracción a una resolución de aproximadamente 1mm, o en el campo cercano (Yuan *et al.*, 2004) con una resolución de 10 a 100 veces mejor.

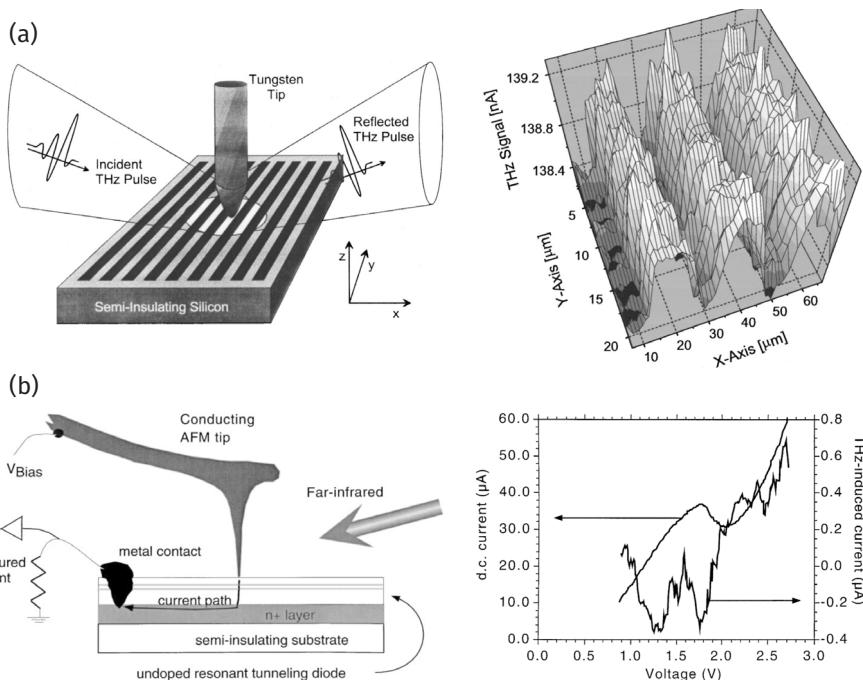
La microscopía basada en enfocar la radiación en el campo lejano, o espacio libre, siguió cercanamente la idea de la microscopía óptica de barrio, en la que un haz enfocado por medio de un espejo curvo o una lente se escanea en una muestra y la radiación transmitida o reflejada se detecta en cada pixel para formar una imagen. Las últimas dos décadas han traído una mejoría sustancial en la disponibilidad comercial de componentes en este rango de frecuencia, especialmente en equipos comerciales THz-TDS. Por lo tanto, hoy día existen numerosos instrumentos comerciales para imagenología terahertz, que permiten un escaneo rápido en espacio y en el espectro. Sin embargo, el límite de difracción ha limitado este tipo de imagenología a objetos en una escala mayor a 1mm. Se han demostrado aplicaciones efectivas en imagenología THz que aprovechan la penetración de la radiación en materiales suaves, la resolución temporal de picosegundos, y la selectividad espectral. Un ejemplo desarrollado en México es la imagenología de pinturas antiguas de valor cultural, en donde la imagenología terahertz revela capas de pintura así como las imágenes correspondientes debajo de la superficie de los cuadros (Koch Dandolo, 2018).

La extensión de la microscopía terahertz al campo cercano, a la escala micrométrica y nanométrica, ha sido mucho más compleja que en el rango

de microondas. La ruta más exitosa ha aprovechado el efecto físico de la concentración del campo eléctrico en una punta de alta curvatura: iluminando desde el campo lejano con radiación terahertz una punta metálica con radio de curvatura en la nanoscalada, la radiación se concentra en la punta y, por ende, la interacción entre la muestra y la radiación se da principalmente en cercanía con la punta. La radiación emitida como consecuencia de esta interacción se colecta con un espejo curvo y se detecta en el campo lejano. Este es el principio de la *microscopía sin apertura*. Su aplicación se demostró hace dos décadas no solo en imagenología directa (Yuan *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2003), sino también en la detección bajo condiciones controladas para visualizar un efecto fundamental como el tunelaje cuántico mediado por fotones (Qureshi *et al.*, 1998) (figura 6).

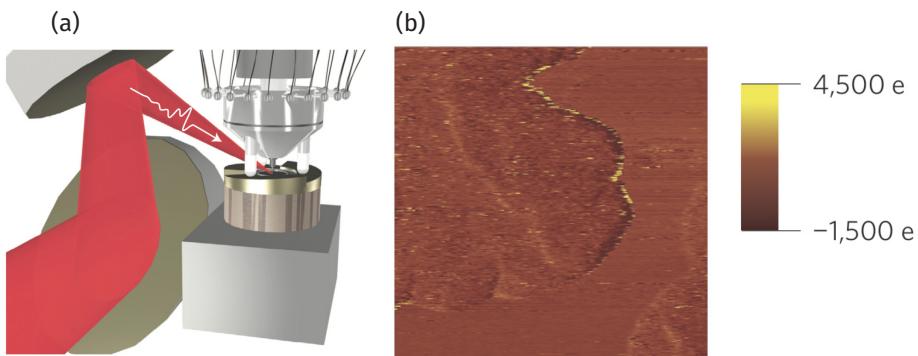
La máxima expresión de esta técnica se ha demostrado recientemente: enfocando la radiación THz-TDS en la punta de un microscopio STM de alto vacío. Para esto, un grupo canadiense logró demostrar tanto resolución atómica como resolución temporal de picosegundos (Cocker *et al.*, 2013), (figura 7). La misma técnica ha sido utilizada recientemente por un grupo alemán para lograr reso-

FIGURA 6. Primeros ejemplos de microscopía terahertz sin apertura: a) imágenes directas de una rejilla de silicio con resolución sub-micrométrica, y, b) el uso de microscopía terahertz para controlar e inyectar corriente en nanoestructuras para revelar procesos cuánticos.



Fuente: a) Chen *et al.* (2003), y, b) Qureshi *et al.* (1998).

FIGURA 7. Microscopía terahertz con resolución sub-nanométrica. a) Esquema de microscopía terahertz combinado son STM, y, b) ejemplo de una imagen con resolución atómica con un mapa de rectificación electrónica en átomos individuales y con un conteo de miles de electrones individuales.



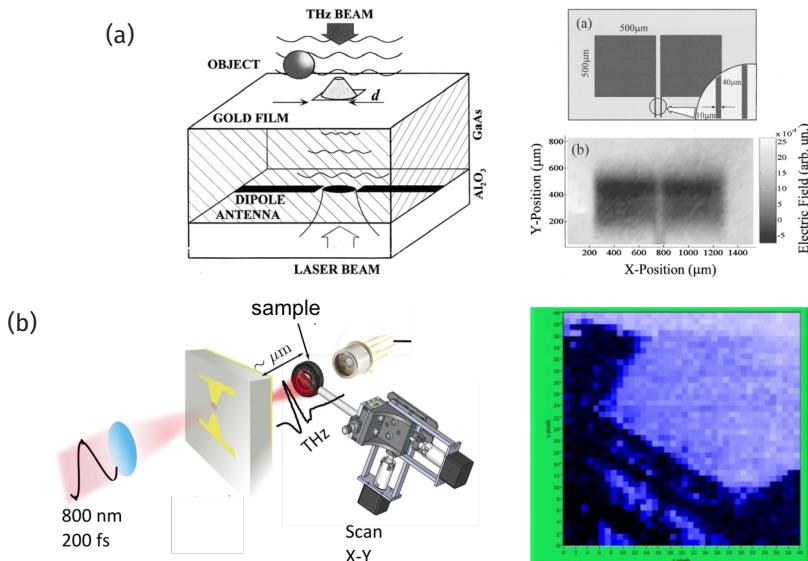
Fuente: Cocker *et al.*, (2013).

lución sub-atómica, resultando en imágenes de moléculas individuales y la dinámica de electrones en escala de tiempo de picosegundos (Cocker *et al.*, 2016). Por la inmensa complejidad de estos experimentos, la técnica queda hoy día limitada en su aplicación a pocos materiales y pocos laboratorios.

A un nivel más práctico, la microscopía de campo cercano terahertz actual se está desarrollando por dos vertientes generales. En una, el uso de antenas u otras estructuras de campo cercano han permitido localizar la radiación en muestras controladas, para después detectar el resultado de la interacción de la radiación con muestras en el campo lejano (Mitrofanov *et al.*, 2000; Qureshi *et al.*, 2018). En combinación con espectroscopía THz-TDS, este tipo de microscopía ha permitido imagenología con resolución de decenas de micrómetros, por debajo del límite de difracción (figura 8) y, al mismo tiempo, la posibilidad de seleccionar la longitud de onda de medición dentro del rango de una fuente TDS, típicamente entre 100 GHz y 1.5 THz. Por lo tanto, este tipo de microscopía es inherentemente hiperespectral. Actualmente, esto es un campo activo de investigación, y la disponibilidad de instrumentos THz-TDS está permitiendo que esta técnica se acerque a un uso práctico.

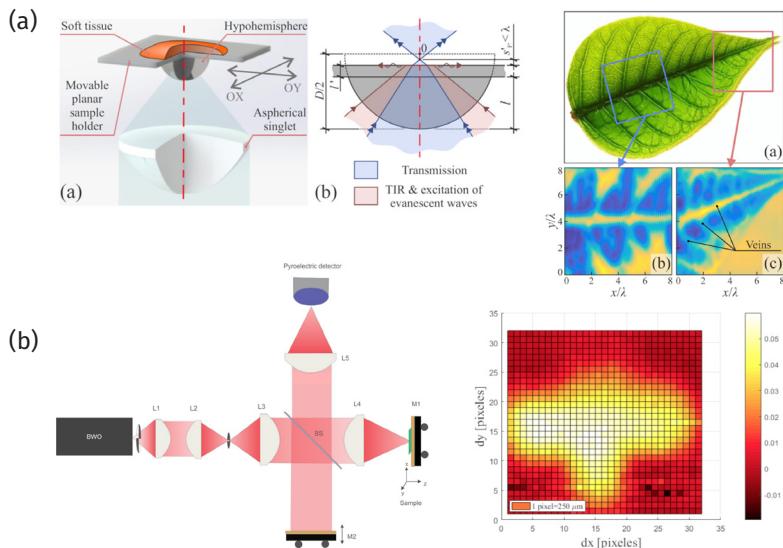
La segunda vertiente consiste en instrumentar una analogía a la microscopía óptica de inmersión: en un microscopio terahertz con un sistema de enfocamiento con lentes de campo lejano, se puede mejorar la resolución con un factor de 2-4 usando una lente de silicio en contacto con la muestra (Chernomyrdin *et al.*, 2018). Este esquema representa retos importantes: la necesidad de una fuente monocromática para el enfoque efectivo y una detección de alta sensibilidad. Un ejemplo desarrollado en la UNAM (figura 9), consiste en un microscopio de inmersión terahertz iluminado por una fuente de radiación terahertz monocromática, un *backward wave oscillator* (BWO).

FIGURA 8. Ejemplos de integración en microscopía terahertz: a) la integración del detector con una antena permite una resolución de decenas de micrómetros, y, b) la integración de la fuente terahertz con una antena concentradora en el mismo microchip permite una resolución de campo cercano de 60 μm .



Fuente: a) Mitrofanov *et al.* (2000), y, b) Qureshi *et al.* (2018).

FIGURA 9. Dos ejemplos de microscopía en onda continua terahertz. a) El uso de lentes de inmersión sólida de silicio permite una resolución por debajo de la longitud de onda en imagenología de plantas, y, b) el uso de un esquema de detección interferométrica permite una sensibilidad adecuada usando detectores piroeléctricos de bajo costo en la imagenología de materia suave como papel.



Fuente: a) Qureshi *et al.* (2018), y, b) García-Jomaso *et al.* (2019).

Considerando las pocas opciones de detección sensible y accesible en onda continua en este rango de frecuencias, se desarrolló un sistema de detección que combina un detector piroeléctrico con un esquema de detección interferométrico. En general, la microscopía de onda continua está limitada por la disponibilidad de fuentes y detectores en este régimen.

Conclusiones

En la actualidad, la microscopía a frecuencias desde GHz hasta THz es una técnica bien desarrollada a nivel de investigación, y en los dos rangos de frecuencias hay ejemplos de resolución nanométrica. A frecuencias de GHz, la implementación de técnicas de campo cercano es mucho más accesible que a frecuencias de THz. Las aplicaciones, hasta la fecha, han sido principalmente a nivel de pruebas de concepto y el reto actual es el desarrollo de instrumentos prácticos.

Referencias

- Adam, A. J. L. (2011). Review of near-field terahertz measurement methods and their applications. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 32: 976-1019.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10762-011-9809-2>
- Beard, M. C., G. M. Turner, C. A. Schmuttenmaer. (2002). Terahertz Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, 106, 7146-7159. <http://dx.doi.org/10.1021/jp020579i>
- Cocker, T. L. et al. (2013). An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope. *Nature Photonics*, 7: 620. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.151>
- Cocker, T. L., D. Peller, P. Yu, J. Repp y R. Huber. (2016). Tracking the ultrafast motion of a single molecule by femtosecond orbital imaging. *Nature*, 539: 263-267. <http://dx.doi.org/10.1038/nature19816>
- Chen, H. T., R. Kersting. (2003). Terahertz imaging with nanometer resolution. *Appl. Phys. Lett.*, 83: 3009. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1616668>
- Chernomyrdin, N. V. et al., (2018). Reflection-mode continuous-wave 0.15λ -resolution terahertz solid immersion microscopy of soft biological tissues. *Appl. Phys. Lett.*, 113(11): 111102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5045480>
- Dhillon, S. S. et al. (2017). The 2017 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50(4). <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>
- García-Jomaso, Angelica Y. et al. (2019). Interferometric detection for terahertz microscopy. *Proc. of SPIE*, 10917 1091715-1.
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2510560>
- Hecht, E. (2017). *Optics*, 5th ed., chap. 5. Pearson Education Limited.
- Hell, Stefan W. et al. (2007). Far field nanoscopy. *Science*, 316: 1153.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1137395>
- Hu, B. B., M. C. Nuss. (1995). Imaging with terahertz waves. *Opt. Lett.*, 20(16): 1716.
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.20.001716>
- Imtiaz, A. et al. (2007). Nanometer-scale material contrast imaging with a near-field



- microwave microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 90, 143106.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.2719164>
- Koch Dandolo, C. L. (2018). Terahertz time-domain imaging to guide a conservation intervention on a stratified easel painting. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 39: 773-784. <http://dx.doi.org/10.1007/s10762-018-0505-3>
- Lee, K. et al. (2009). Visualization of magnetic domains by near-field scanning microwave microscope. *Ultramicroscopy*, 109: 889-893.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2009.03.013>
- López-Maldonado, Guillermo et al. (2014). Graphite thin film characterization using a simplified resonant near field scanning microwave microscope. *Revista Mexicana de Física*, 60(88).
- Mitrofanov, O. et al., (2000). Terahertz near-field microscopy based on a collection mode detector. *Appl. Phys. Lett.*, 77(22): 3496-3498.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1328772>
- Ordoñez-Romero, César L. et al. (2019). Pulsed spin wave propagation in a magnonic crystal. *J. Appl. Phys.* 126, 083902. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5111765>
- Park, J. Hyun S, Kim A, Kim T, Char K. (2005). Observation of biological samples using a scanning microwave microscope. *Ultramicroscopy*, 102 (2005): 101-106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultramic.2004.09.007>
- Qureshi, Naser et al. (1998). Terahertz excitation of AFM-defined room temperature quantum dots. *Physica E*, 2: 701-703
- Qureshi, Naser et al. (2012). An active resonator based on magnetic films for near field microwave microscopy. *Journal of Applied Physics*, 111, 07A504. DOI: 10.1063/1.3672081
- Qureshi, Naser et al. (2018). Terahertz and millimeter wave imaging: a portable tool for characterization. *IEEE Photonics Society Newsletter*, 32(6): 4-9.
- Rosner, Bjorn T. y Daniel W. van der Weide. (2002). High-frequency near-field microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, 73: 2505. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1482150>
- Synge, E. H.(1928). XXXVIII. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 6(35): 356-362.
<http://dx.doi.org/10.1080/14786440808564615>
- Yuan, T., J. Z. Xu, X. C. Zhang. (2004). Development of terahertz wave microscopes. *Infrared Physics & Technology* 45: 417-425.
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.01.016>